

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja merupakan logam yang sering banyak digunakan manusia selain logam-logam lain seperti tembaga, perak, emas, dan sebagainya. Penggunaan baja saat ini sudah menjadi hal yang umum terutama untuk konstruksi dan bahan bangunan. *(Permadi & Palupi, 2014)*.

Baja adalah paduan Fe-C (kandungan karbon maksimum sekitar 2%) yang dapat mengandung elemen paduan lainnya, sesuai dengan aplikasinya. Bahkan variasi rendah dalam komposisi tersebut dapat menyebabkan perbedaan besar dalam sifat mekanik, karena struktur akhir dapat berubah sesuai dengan pengolahan manufaktur dan juga siklus perlakuan panas yang diterapkan. *(Sari, 2017)*.

Baja adalah suatu campuran dari besi (Fe) dan karbon (C), dimana unsur karbon (C) menjadi dasar. Disamping unsur Fe dan C, baja juga mengandung unsur campuran lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), dan mangan (Mn) yang jumlahnya dibatasi. Baja karbon sedang dan baja karbon tinggi mengandung banyak karbon dan unsur lain dapat memperkeras baja, karena itu daerah pengaruh panas atau HAZ pada baja ini mudah menjadi keras bila dibandingkan baja karbon rendah. Sifatnya yang mudah menjadi keras ditambah dengan adanya hydrogen difusi menyebabkan baja ini sangat peka terhadap retak las. Disamping itu pengelasan dengan menggunakan elektroda yang sama kuat dengan logam lasnya dengan pemanasan mula dan suhu pemanasan tergantung dari kadar

karbon. Baja karbon adalah baja yang mengandung karbon antara 0,1% - 1,7%. Berdasarkan tingkatan banyaknya kadar karbon, baja digolongkan menjadi tiga tingkatan: Baja karbon rendah, Baja karbon sedang, Baja karbon tinggi. (Istiqlaliyah & Rhohman, 2016).

Baja merupakan paduan yang terdiri dari besi, karbon dan unsur yang lainnya. Seperti : Silicon (Si), Faspur (S), Tembaga (Cu). Karbon merupakan suatu unsur terpenting karena dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Baja merupakan logam yang paling banyak digunakan dalam dunia teknik, dalam bentuk pelat, lembaran, pipa batang, profil dan sebagainya. (Manurung & Napitupulu, 2014)

2.1.1 Jenis Baja Karbon (*Carbon Steel*)

2.1.1.1 Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja karbon rendah ini disebut dengan baja lunak atau baja yang bukan keras. Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon kurang dari 0,25% C. Baja karbon rendah digunakan untuk kawat, baja profil, mur, baut, ulir sekrup, dan lain-lain.

2.1.1.2 Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)

Baja karbon sedang memiliki kandungan karbon diatas 0,25% C – 0,6% C ditambah dengan unsur paduan tertentu biasanya digunakan untuk rel kereta api dan sejumlah peralatan mesin seperti roda gigi otomotif, poros bubutan, poros engkol, sikrup dan alat angkat presisi.

2.1.1.3 Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon diatas 0,6% C – 1,4% C dibuat dengan roll panas. Baja karbon tinggi digunakan untuk perkakas seperti pisau, gurdi, tap dan bagian-bagian yang tahan gesekan. Apabila baja ini digunakan untuk bahan khusus, maka harus dikerjakan dalam keadaan panas dan digunakan untuk peralatan mesin-mesin berat, batang-batang pengontrolan, alat tangan seperti palu, obeng, tang, dan lain-lain. (*Manurung & Napitupulu, 2014*).

Baja karbon biasanya diklarifikasikan seperti ditunjukkan di bawah ini :

a. Baja karbon rendah

Mengandung karbon antara 0,05 hingga 0,30 wt% C. Memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) 275 MPa (40.000 psi), kekuatan tarik (*tensile strength*) antara 415 dan 550 MPa (60.000 dan 80.000 psi), dan keuletan (*ductility*) dari 25% EL. Relatif lunak dan lemah tetapi memiliki ketangguhan dan keuletan yang luar biasa. Di samping itu, baja karbon rendah memiliki sifat mudah ditempa, mudah di mesin, dan mudah di las.

b. Baja karbon menengah

Memiliki konsentrasi karbon berkisar antara 0,30 hingga 0,60 wt% C. Memiliki tingkat kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja karbon rendah. Mempunyai sifat yang sulit dibengkokkan, di las, dan dipotong.

c. Baja karbon tinggi

Biasanya mengandung karbon sebesar 0,60 hingga 1,4 wt% C. Merupakan karbon yang paling sulit untuk dibentuk, ditempa, di las, dan dipotong tetapi memiliki tingkat keuletan paling tinggi. Memiliki sifat

sangat keras dan tahan aus. Baja karbon tinggi ini biasa digunakan untuk mesin pemotong, pisau, pisau gergaji besi, per (*spring*), dan kawat baja berkekuatan tinggi. (Afandi, Arief, & Amiadji, 2015).

2.1.2 Baja ST 37

Baja yang penulisannya diawali dengan St, maka bilangan yang mengikutinya menunjukkan kekuatan tarik minimum (dalam kg/mm^2) yang dimiliki baja tersebut. Jadi, baja tipe St 37 menunjukkan bahwa baja ini mempunyai kekuatan tarik $\leq 37\text{kg/mm}^2$. Baja St 37 merupakan baja karbon kelas rendah, karena mempunyai kandungan karbon kurang dari 0,30% dan lebih dari 90% besi. (Andinata, Destyorini, Sugiarti, & Munasir, 2012).

Baja St 37 termasuk kedalam golongan baja karbon rendah karena mempunyai sifat mudah ditempa dan mudah di mesin. Baja karbon rendah mengandung 0,022% - 0,3% yang dibagi menjadi empat bagian menurut kandungannya yaitu :

- a. Baja karbon rendah mengandung 0,04% C digunakan untuk plat-plat strip.
- b. Baja karbon rendah mengandung 0,05% C digunakan untuk badan kendaraan.
- c. Baja karbon rendah mengandung 0,05% - 0,25% C digunakan untuk konstruksi jembatan dan bangunan.
- d. Baja karbon rendah mengandung 0,05% - 0,3% C digunakan untuk baut paku keling, karena kepalanya harus dibentuk. (Saparin, 2016).

Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*) bersifat lunak, kekuatan relatif rendah, tapi keuletannya tinggi atau sering disebut baja lunak (*Mil Steel*) dengan

kandungan karbon kurang dari 0,3%. Baja karbon rendah bersifat luas penggunaannya sebagai baja konstruksi, rangka kendaraan, mur, baut, pipa, tangki, minyak, dan lain-lain karena memiliki sifat pengerjaan yang baik seperti sifat keuletan, sifat mampu tempa, kelunakan, dan mampu mesin yang baik. (Baroto & Sudargo, 2017).

Baja St 37 disebut juga baja karbon rendah yang memiliki kandungan karbon kurang dari 0,3%. Baja ini sering digunakan untuk konstruksi-konstruksi mesin yang saling bergesekan. Selain itu, baja dengan unsur utama Fe dan C bisa dipadukan dengan unsur lain seperti Mn, S, P, dan sebagainya untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan. Namun kekerasan permukaan baja St 37 tergolong sangat rendah, sebelum digunakan perlu diperbaiki dibuat kekerasan dan permukaan baja. (Setyowidodo & Akbar, 2018).

2.1.2.1 Unsur-Unsur yang Terkandung dalam Baja ST 37

Unsur-unsur yang terkandung dalam baja akan mempengaruhi sifat-sifat mekanis dan fisis dari baja yang bersangkutan. Jenis-jenis baja umumnya ditentukan berdasarkan kandungan unsur karbon yang terkandung dalam material baja tersebut. Tabel berikut ini menunjukkan data komposisi kimia unsur-unsur yang ada dalam material spesimen. Berdasarkan kandungan karbon dalam material dapat disimpulkan bahwa material yang digunakan tergolong *low carbon steel* dengan kadar karbon 0,12%. Komposisi kimia baja St 37 dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Komposisi kimia Baja St 37

Komposisi Kimia (%)							
C	P	S	Mn	S ₁	Cu	Al	Fe
0.12	0.04	0.05	0.50	0.10	0.10	0.02	Sisa

Sifat baja karbon sangat tergantung pada kadar karbon oleh karena itu baja karbon dikelompokkan berdasarkan kadar karbonnya. Baja dengan kadar karbon kurang dari 0,3% disebut baja karbon rendah, baja dengan kadar karbon 0,3%-0,6% disebut dengan baja karbon sedang dan baja dengan kadar karbon 0,6%-1,5% disebut dengan baja karbon tinggi. (*Saputra, Syarife, & Maulana, 2014*).

Baja karbon kelas rendah mudah teroksidasi, memiliki kekuatan yang relatif rendah, keuletan yang baik, dan banyak diaplikasikan untuk tabung, pipa, dan komponen mesin berkekuatan rendah. Tabel 2.2 menunjukkan kandungan unsur-unsur pembentuk baja St 37. (*Andinata, Destyorini, Sugiarti, & Munasir, 2012*).

Tabel 2.2 Komposisi Baja Karbon Rendah Tipe St 37

Unsur	Kandungan (%)	Unsur	Kandungan (%)
Fe	99,310	S	0,015
Mn	0,375	Co	0,007
C	0,118	Nb	0,006
Si	0,055	Cu	Maks. 0,004
W	0,046	Mo	Maks. 0,004
Ni	0,026	Al	Maks. 0,002
Cr	0,021	V	Maks. 0,001
P	0,017	-	-

2.2 Heat Treatment

Heat Treatment adalah salah satu proses untuk mengubah struktur logam dengan jalan memanaskan *specimen* pada tungku pemanas dengan temperatur

rekristalisasi selama periode waktu tertentu kemudian didinginkan pada media pendingin seperti udar, air, air garam, *oil* dan solar yang masing-masing mempunyai kerapatan pendinginan yang berbeda-beda. Sifat-sifat logam yang terutama sifat mekanik yang sangat dipengaruhi oleh struktur mikrologam disamping posisi kimianya, contohnya suatu logam atau paduan akan mempunyai sifat mekanis yang berbeda-beda struktur mikronya diubah, dengan adanya pemanasan atau pendinginan dengan kecepatan tertentu maka bahan-bahan logam dan paduan memperlihatkan perubahan strukturnya. (Purwanto, 2011).

Perlakuan panas (*heat treatment*) diberikan pada baja untuk menghasilkan sifat-sifat diinginkan dan penggunaannya. Perlakuan panas diawali dengan proses austenisasi (pemanasan hingga temperatur austenit) yang kemudian disusul pendinginan dengan beragam kecepatan pendinginannya, yang akan menghasilkan fasa akhir yang terbentuk berbeda-beda. Dengan pendinginan yang lambat, akan terbentuk struktur mikro coarse pearlite dan lapisan tipis ferit-semenit. Ditingkatkannya laju pendinginan akan mengurangi ketebalan lamela. Jika ditingkatkan lagi akan membentuk struktur mikro bainit. Laju pendinginan yang sangat cepat akan menghasilkan struktur mikro martensit. (Saparin, 2016).

2.2.1 Proses Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Tujuan dari proses perlakuan panas (*heat treatment*) adalah untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi, kekuatan dan *fatigue limit/strength* yang lebih baik. Kekerasan yang dapat tercapai tergantung pada kadar karbon dalam baja dan kekerasan yang terjadi akan tergantung pada temperatur pemanasan (*temperature autenitising*), *holding time* dan laju pendinginan yang dilakukan

serta seberapa tebal bagian penampang yang menjadi keras banyak tergantung pada *hardenability*. Langkah-langkah Proses *heat treatment* adalah sebagai berikut :

1. Pemanasan benda uji pada suhu 800°C, langkah ini bertujuan untuk mendapatkan struktur *austenite* sehingga dapat ditentukan struktur yang diinginkan.
2. Penahanan suhu (*holding*), *Holding time* dilakukan untuk mendapatkan kekerasan maksimum dari suatu bahan pada proses *hardening* dengan menahan pada temperatur pengerasan untuk memperoleh pemanasan yang homogen sehingga struktur austenitnya homogen atau terjadi kelarutan karbida ke dalam austenit dan *diffusi* karbon dan unsur paduannya.
3. Pendinginan/*Quenching*, untuk proses *hardening* kita melakukan pendinginan secara cepat dengan menggunakan media seperti air, *oil*, dll. Tujuannya adalah untuk mendapatkn struktur martensit, semakin banyak unsur karbon, maka struktur *martensite* yang terbentuk juga akan semakin banyak, karena martensit terbentuk dari fase austenit yang didinginkan secara cepat. Hal ini disebabkan karena atom karbon tidak sempat berdifusi keluar dan terjebak dalam struktur kristal dan membentuk struktur tetragonal yang ruang kosong antar atomnya kecil, sehingga kekerasannya meningkat. (Saputra & Tyastomo, 2016). Gambar *Furnace* dapat dilihat pada Gambar 2.1



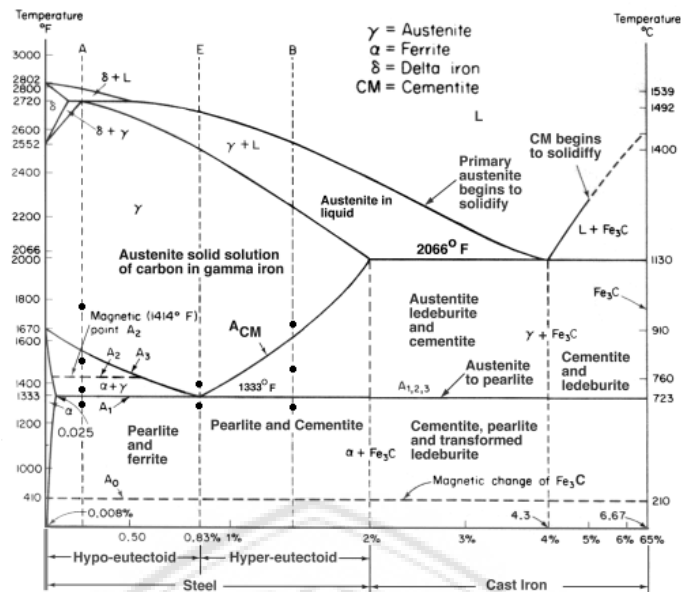
Gambar 2.1 Dapur Pemanasan (Furnace)

2.2.2 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Diagram keseimbangan fasa besi-besi karbida dapat dilihat pada gambar 2. Diagram ini dihasilkan pada proses pendinginan lambat. Baja dan besi tuang yaitu ada kebanyakan berupa paduan besi karbon, dimana karbonnya berupa senyawa *intertisial* (simentit). Simentit merupakan struktur logam yang stabil. Selain unsur karbon pada besi dan baja terkandung kurang lebih 0,25% Si, 0,3-1,5% Mn serta unsur pengotor lain seperti P, dan S. karena unsur-unsur tadi tidak digunakan dengan menghiraukan adanya unsur-unsur tersebut. Melalui diagram keseimbangan Fe-Fe₃C secara garis besar baja dapat juga dikelompokkan sebagai berikut :

1. Baja *hypoeutectoid* dengan kandungan karbon 0,008%-0,80%.
2. Baja *eutectoid* dengan kandungan karbon 0,8%.
3. Baja *hypereutectoid* dengan kandungan karbon 0,8%-2%.

Diagram fasa Fe-Fe₃C sangat penting dibidang metalurgi karena sangat bermanfaat dalam menggambarkan perubahan-perubahan fasa pada baja seperti pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C

Pada gambar 2.2 ditampilkan diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C, fasa-fasa yang terdapat pada diagram diatas dapat dijelaskan seperti berikut. A₁ adalah temperatur reaksi *eutectoid* yaitu perubahan fasa γ menjadi $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (perlit) untuk baja *hypoeutectoid*. A₂ adalah titik *currie* (pada temperatur 769°C), dimana sifat magnetik besi berubah dari feromagnetik menjadi paramagnetik. A₃ adalah temperatur transformasi dari fasa γ menjadi α (ferit) yang ditandai pula dengan naiknya batas kelarutan karbon seiring dengan turunnya tempertaure. Acm adalah temperatur transformasi dari fasa γ menjadi Fe₃C (simentit) yang ditandai pula dengan penurunan batas kelarutan karbon seiring dengan turunnya temperatur. Sedangkan pada A₁₂₃ adalah temperatur transformasi γ menjadi $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (perlit) untuk baja *hypereutectoid*. Beberapa fasa yang sering ditemukan dalam baja karbon :

1. Austenit

Austenit adalah campuran besi dan karbon yang terbentuk pada pembekuan, pada proses pendinginan selanjutnya *austenit* berubah menjadi ferit, perlit dan sementit. Sifat austenit adalah lunak, lentur dengan keliatan tinggi. kadar karbon maksimum sebesar 2,14%.

2. Ferit

Ferit ini disebut alpha (α), ruang antar atomnya kecil dan rapat sehingga hanya sedikit menampung atom karbon. Oleh sebab itu daya larut karbon dalam ferit rendah kurang dari 1 atom karbon per 1000 atom besi. Pada suhu ruang, kadar karbonnya 0,008% sehingga dapat dianggap besi murni. kadar maksimum karbon sebesar 0,025%, pada suhu 723°C. Ferit bersifat magnetik sampai suhu 768°C. Ferit lunak dan liat, kekerasan dari ferit berkisar antara 140-180 HVN. (*Vicker Hardness Number*).

3. Perlit

Fasa ini merupakan campuran mekanis yang terdiri dari dua fasa, yaitu ferit dengan kadar karbon 0,025% dan sementit alam bentuk lamelar (lapisan) dengan kadar karbon 6,67% yang berselang seling rapat terletak bersebelahan. Jadi perlit merupakan struktur mikro, kekerasan dari perlit kurang lebih berkisar antara 180-250 HVN.

4. Bainit

Bainit merupakan fasa yang terjadi akibat transformasi pendinginan yang sangat cepat pada fasa *austenite* ke suhu antar 250°C-550°C dan ditahan pada suhu tersebut (*isothermal*). Bainit adalah struktur mikro campuran fasa ferit dan sementit (Fe_3C). Kekerasan bainit kurang lebih berkisar antara 300-400 HVN.

5. Martensit

Martensit merupakan fasa dimana ferit dan sementit bercampur, tetapi bukan dalam *lamellar*, melainkan jarum-jarum sementit. Fasa ini terbentuk dari austenite stabil didinginkan dengan laju pendinginan cepat. Terjadinya hanya presipitasi Fe_3C unsur paduan lainnya tetapi larut transformasi *isothermal* pada 260°C untuk membentuk dispersi karbida yang halus dalam matriks ferit. Martensite bilah (*lath martensite*) terbentuk jika kadar karbon dalam baja sampai 0,6% sedangkan di atas 1% C akan terbentuk martensit pelat (*plate martensite*). Perubahan dari tipe bilah ke plat terjadi pada interval 0,6% C - 1,08%. Kekerasan dari martensi lebih dari 500 HVN.

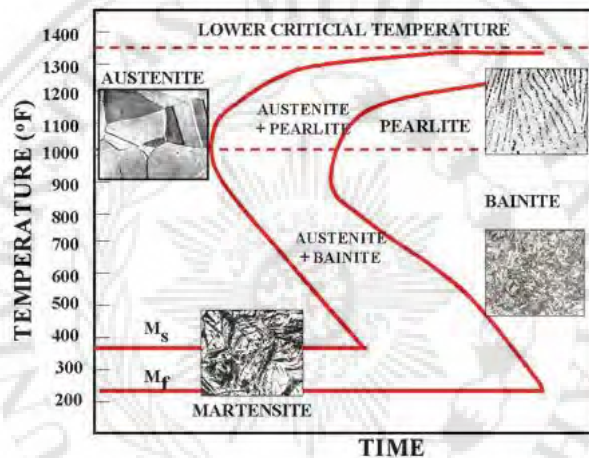
6. Sementit (Karbida Besi)

Pada paduan besi melenihi batas daya larut membentuk fasa kedua yang disebut karbida besi (simentit). Karbida besi mempunyai komposisi kimia Fe_3C . Dibandingkan dengan ferit, sementit sangat keras. Karbida besi murni tidak liat, karbida ini tidak dapat menyesuaikan diri dengan adanya konsentrasi tegangan, oleh karena itu kurang kuat. Kekerasan sementit adalah 800 HVN. (Mersilia, 2016).

2.2.3 Transformasi Fasa pada Baja

Perubahan fasa yang terjadi sewaktu baja diberikan perlakuan panas berbeda dengan yang terakhir pada diagram keseimbangan paduan besi karbit. Perbedaan ini disebabkan karena perbedaan waktu, atau faktor kecepatan pendinginan atau pemanasan, Baja hypoeutectoid, pada waktu pemanasan mencapai temperatur kritis bawah maka perlit mulai bertrasportasi menjadi austenite dengan komposisi sekitar 0,8% C, dan pada temperatur yang lebih tinggi

ferit juga mulai menjadi austenit, tetapi austenite yang terjadi ini masih mengandung karbon yang sedikit. Pada saat temperatur pemanasan baru mencapai temperatur kritis atas tentu saja masih ada austenit dengan komposisi yang tidak sama satu dengan yang lainnya. Untuk membuat austenite menjadi lebih homogen maka perlu diberi kesempatan pada atom-atom untuk berdifusi secara sempurna, Untuk memperkirakan perubahan fasa yang terjadi dalam perlakuan panas yang akan digunakan suatu diagram disebut diagram *Isothermal transformation* atau *TTT diagram* seperti pada gambar 2.3. (Wahyuana 2014).



Gambar 2.3 Diagram T-T-T

2.3 Korosi

Korosi adalah kerusakan atau keausan dari material akibat terjadinya reaksi lingkungan yang didukung oleh faktor-faktor tertentu. Secara spesifik korosi didefinisikan sebagai kumpulan dari keseluruhan proses dengan jalan dimana *metal* atau *alloy* yang digunakan untuk material struktur berubah bentuk dari bersifat metal menjadi beberapa kombinasi dari kondisi yang disebabkan oleh interaksi dengan lingkungan. (Hidayat, Rochani, & Supomo, 2013).

Korosi didefinisikan sebagai kehancuran atau kerusakan material karena reaksi dengan lingkungan. Beberapa pengertian menekankan bahwa definisi harus dibatasi untuk logam, tetapi sering para ahli korosi harus mempertimbangkan baik logam dan non logam untuk solusi masalah yang diberikan. Sebagai contoh, kerusakan cat dan karet oleh sinar matahari atau bahan kimia, fluks dari lapisan tungku pembuatan baja dan menyerang dari logam padat dengan logam cair lain (korosi logam cair) semua dianggap korosi. (Putri, Rochani, & Supomo, 2012).

Korosi atau pengkaratan merupakan fenomena kimia pada bahan-bahan logam yang pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang kontak langsung dengan lingkungan berair dan oksigen. Selain itu, korosi merupakan salah satu penyebab penurunan mutu dari material logam, dengan proses degradasi/deteorisasi. (Ojahan & Winata, 2013).

Korosi adalah serangan yang bersifat merusak pada suatu logam oleh reaksi kimia atau elektro kimia dengan lingkungannya. Pada konstruksi yang terbuat dari logam maupun non logam, korosi dapat menimbulkan kerugian biaya yang sangat besar. Selain itu, korosi merupakan masalah serius yang terjadi pada logam karena bisa mengurangi nilai ekonomis dari logam tersebut. (Nova & Misbah, 2012).

2.3.1 Jenis-Jenis Korosi

2.3.1.1 Korosi Seragam (*Uniform Corroton*)

Korosi seragam merupakan korosi dengan serangan merata pada seluruh permukaan logam. Korosi terjadi pada permukaan logam yang terekspos pada lingkungan korosif. Gambar *Uniform Corrosion* dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Korosi Seragam (Uniform Corrosion)

2.3.1.2 Korosi Galvanik (*Galvanic Corrosion*)

Korosi galvanik terjadi jika dua logam yang berbeda tersambung melalui elektrolit sehingga salah satu dari logam tersebut akan terserang korosi sedang lainnya terlindungi dari korosi. Untuk memprediksi logam yang terkorosi pada galvanic dapat dilihat pada deret galvanik. Gambar korosi galvanik dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Korosi Galvanik (Galvanic Corrosion)

2.3.1.3 Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)

Mirip dengan korosi galvanik, dengan pengecualian pada perbedaan konsentrasi media korosifnya. Celah atau ketidakrataan permukaan lainnya seperti celah paku keling (*rivet*), baut, *washer*, gasket, deposit, dan sebagainya,

yang bersentuhan dengan media korosif dapat menyebabkan korosi terlokalisasi.

Gambar korosi galvanik dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Korosi Celah (Crevice Corrosion)

2.3.1.4 Korosi Sumuran

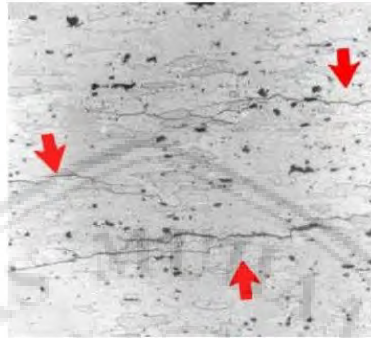
Korosi sumuran terjadi karena adanya serangan korosi lokal pada permukaan logam sehingga membentuk cekungan atau lubang pada permukaan logam. Korosi logam pada baja tahan karat terjadi karena rusaknya lapisan pelindung (*passive film*). Gambar korosi galvanik dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Korosi Sumuran (Pitting Corrosion)

2.3.1.5 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corroton*)

Korosi yang menyerang pada batas butir akibat adanya segregasi dari unsur pasif seperti krom meninggalkan batas butir sehingga pada batas butir bersifat anodic. Gambar korosi batas butir dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)

2.3.1.6 Korosi Erosi (*Erosion Corroton*)

Korosi erosi disebabkan oleh kombinasi fluida korosif dan kecepatan aliran yang tinggi. Bagian fluida yang kecepatan alirannya rendah, sedangkan fluida kecepatan tinggi menyebabkan terjadinya erosi dan dapat menguras lapisan pelindung sehingga mempercepat korosi. Gambar korosi erosi dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2.9 Korosi Erosi (*Errosion Corrosion*)

2.3.1.7 Korosi Aliran (*Flow Induced Corroction*)

Korosi aliran digambarkan sebagai efek dari aliran terhadap terjadinya korosi. Meskipun mirip, antara korosi aliran dan korosi erosi adalah dua hal yang berbeda. Korosi aliran adalah peningkatan laju korosi yang disebabkan oleh turbulensi fluida dan perpindahan massa akibat dari aliran fluida diatas permukaan logam. Korosi erosi adalah naiknya korosi dikarenakan benturan secara fisik pada permukaan oleh partikel yang terbawa fluida. (Sidiq, 2013). Gambar korosi erosi dapat dilihat pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Korosi Aliran (*Flow Induced Corrosion*)

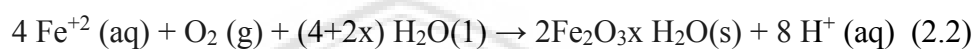
2.3.2 Proses terjadinya Korosi

Korosi logam melibatkan proses anodik, yaitu oksidasi logam menjadi ion dengan melepaskan elektron ke dalam permukaan logam dan proses katodik yang mengkonsumsi electron tersebut dengan laju yang sama. Proses katodik

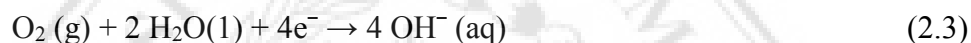
merupakan reduksi ion hidrogen atau oksigen dari lingkungan sekitarnya. Contoh persamaan reaksi korosi pada logam besi dapat dilihat pada persamaan 2.1



Reaksi ini terjadi pada lingkungan asam dimana ion H^+ sebagian dapat diperoleh dari reaksi karbon dioksida atmosfer dengan air membentuk H_2CO_3 . Ion Fe^{+2} yang terbentuk di anoda, kemudian teroksidasi lebih lanjut oleh oksigen membentuk besi oksida seperti yang terlihat pada persamaan 2.2



Jika proses korosi terjadi dalam lingkungan basa, maka reaksi katodik yang terjadi dapat dilihat persamaan 2.3



Oksidasi lanjut ion Fe^{+2} tidak berlangsung karena lambatnya gerak ion ini sehingga sulit berhubungan dengan oksigen udara luar, tambahan pula ion ini segera ditangkap oleh garam kompleks hexasianoferrat membentuk senyawa kompleks stabil biru. Lingkungan basa tersedia karena kompleks kalium hexasianoferrat.

Korosi besi relatif cepat terjadi dan berlangsung terus, sebab lapisan senyawa besi oksida yang terjadi bersifat *porous* sehingga mudah ditembus oleh udara maupun air, tetapi meskipun aluminium mempunyai potensial reduksi jauh lebih negatif ketimbang besi, namun proses korosi lanjut menjadi terhambat karena hasil oksidasi Al_2O_3 , yang melapisinya tidak bersifat *porous* sehingga melindungi logam yang dilapisi dari kontak dengan udara luar. (Ojahan & Winata, 2013).

2.3.3 Laju Korosi

Laju korosi adalah kecepatan merambat suatu reaksi atau kecepatan turunnya kualitas material yang terkena korosi terhadap waktu. Menghitung laju korosi dapat dilakukan dengan metode kehilangan berat yaitu perhitungan laju korosi dengan menghitung berkurangnya berat suatu material terhadap reaksi korosi yang terjadi. Metode ini membutuhkan waktu untuk melihat pengurangan berat yang terjadi pada material yang terendam larutan elektrolit di karenakan reaksi korosi yang terjadi. (Sugiarto, 2018). Untuk menghitung laju korosi dengan metode kehilangan berat maka digunakan rumus persamaan 2.4. (Sugiarto, 2018).

$$\text{Corrothion Rate (r)} = \frac{W \times K}{D \ A_s \ T} \quad (2.4)$$

Keterangan :

CR : Laju korosi (mmpy)

K : Konstanta ($8,76 \times 10^4$)

T : Waktu (jam)

A : Luas permukaan yang direndam (Cm^2)

W : Kehilangan berat (gram)

D : Densitas (g/cm^3)

Nilai konstanta yang digunakan pada permsamaan laju korosi dapat menggunakan nilai konstanta pada tabel 2.3. (Reaproved, 1999).

Tabel 2.3 Konstanta Perhitungan Laju Reaksi Korosi
Berdasarkan Satuannya

Satuan Laju Korosi	Konstanta (K)
Mils per year (mpy)	$3,45 \times 10^6$
Inchies per year (ipy)	$3,45 \times 10^3$
Inches per month (ipm)	$2,87 \times 10^2$
Milimeters per year (mm/y)	$8,76 \times 10^7$
Micrometers per year ($\mu\text{m/y}$)	$8,76 \times 10^4$
Picometers per second (pm/s)	$2,87 \times 10^6$
Grams per square meter per hour ($\text{g/m}^2 \text{ h}$)	$1,00 \times 10^4 D^A$
Miligrams per square decimeter per day (mdd)	$2,40 \times 10^6 D^A$
Micrograms per square meter per second ($\mu\text{g/m}^2 \text{ s}$)	$2,78 \times 10^6 D^A$

Laju korosi pada umumnya dapat diukur dengan menggunakan dua metode yaitu: metode kehilangan berat dan metode elektrokimia. Metode kehilangan berat adalah menghitung kehilangan berat yang terjadi setelah beberapa waktu pencelupan. Penelitian ini menggunakan metode kehilangan berat dimana dilakukan perhitungan selisih antara berat awal dan akhir.

Satuan laju korosi :

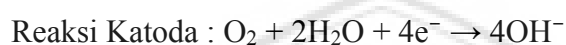
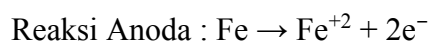
1. Pengurangan berat = g atau mg
2. Berat/satuan luas permukaan logam = mg/mm^2
3. Berat perluas perwaktu = $\text{mg/dm}^2\text{day}$ (mdd), $\text{g/dm}^2.\text{day}$, $\text{g/cm}^2.\text{hour}$, $\text{g/m}^2.\text{h}$, $\text{moles/cm}^2.\text{h}$
4. Dalam penetrasi per waktu : inch/year (mpy), 1 milli = 0,001 inch.

(Pattireuw, Rauf, & Lumintang, 2013).

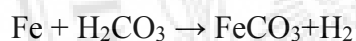
2.3.4 Faktor-Faktor yang mempengaruhi Laju Korosi

2.3.4.1 Faktor Gas Terlarut

Oksigen (O_2), adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada metal seperti laju korosi pada *mild steel alloys* akan bertambah dengan meningkatnya kandungan oksigen. Reaksi korosi secara umum pada besi karena adanya kelarutan oksigen adalah sebagai berikut :



Karbendioksida (CO_2), jika karbon dioksida dilarutkan dalam air maka akan terbentuk asam karbonat (H_2CO_3) yang dapat menurunkan pH air dan meningkatkan korosifitas, biasanya bentuk korosinya berupa pitting yang secara umum reaksinya adalah :



2.3.4.2 Faktor Temperature

Penambahan temperatur umumnya menambah laju korosi walaupun kenyataannya kelarutan oksigen berkurang dengan meningkatnya temperatur. Apabila metal pada temperatur yang tidak uniform, maka akan besar kemungkinan terbentuk korosi.

2.3.4.3 Faktor Ph

Ph netral adalah 7, sedangkan $ph < 7$ bersifat asam dan korosif, sedangkan untuk $pH > 7$ bersifat basa juga korosif. Tetapi untuk besi, laju korosi

rendah pada pH antara 7 sampai 13. Laju korosi akan meningkat pada $\text{pH} < 7$ dan pada $\text{pH} > 13$.

2.3.4.4 Faktor Bakteri Pereduksi atau Sulfat *Reducing Bacteria* (SRB)

Adanya bakteri pereduksi sulfat akan mereduksi ion sulfat menjadi gas H_2S , yang mana jika gas tersebut kontak dengan besi akan menyebabkan terjadinya korosi.

2.3.4.5 Faktor Padatan Terlarut

Klorida (Cl), klorida menyerang lapisan *mild steel* dan lapisan *stainless steel*. Padatan ini menyebabkan terjadinya pitting, *crevice corrosion*, dan juga menyebabkan pecahnya *alloys*.

Karbonat (CO_3), kalsium karbonat sering digunakan sebagai pengontrol korosi dimana film karbonat diendapkan sebagai lapisan pelindung permukaan metal, tetapi dalam produksi minyak hal ini cenderung menimbulkan masalah scale.

Sulfat (SO_4), ion sulfat ini biasanya terdapat dalam minyak. Dalam air, ion sulfat juga ditemukan dalam konsentrasi yang cukup tinggi dan bersifat kontaminan, dan oleh bakteri SRB sulfat diubah menjadi sulfide yang korosif. (Sidiq, 2013).

2.3.5 Dampak Korosi

Korosi yang terjadi pada logam tidak dapat dihindari, tetapi hanya dapat dicegah dan dikendalikan sehingga struktur atau komponen mempunyai masa pakai yang lebih lama. Setiap komponen atau struktur mengalami tiga tahapan utama yaitu perancangan, pembuatan dan pemakaian. Ketidakberhasilan salah satu aspek seperti korosi menyebabkan komponen akan mengalami kegagalan.

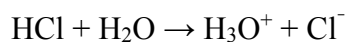
Kerugian yang akan dialami dengan adanya korosi meliputi finansial dan safety, diantaranya :

- Penurunan kekuatan material
- Penipisan
- *Downtime* dari *equipment*
- Retak & pitting
- Kebocoran fluida
- *Embrittlement*
- Penurunan sifat permukaan material
- Penurunan nilai / hasil produksi
- Modification. (Sidiq, 2013).

2.4 Asam Klorida

Larutan asam klorida atau yang biasa dikenal dengan larutan HCl dalam air adalah cairan kimia yang sangat korosif dan berbau menyengat. HCl termasuk bahan kimia berbahaya atau B3. Dalam skala industri, HCl biasanya diproduksi dengan konsentrasi 38%. Ketika dikirim ke industri pengguna, HCl dikirim dengan konsentrasi antara 32~34%. Pembatasan konsentrasi HCl ini karena

tekanan uapnya yang sangat tinggi, sehingga menyebabkan kesulitan ketika penyimpanan. Hidrogen klorida (HCl) adalah asam monoprotik, yang berarti bahwa ia dapat berdisosiasi melepaskan suatu H^+ ini bergabung dengan molekul air membentuk ion hidronium, H_3O^+ :



Ion lain yang terbentuk adalah ion klorida, Cl^- . Asam klorida dapat digunakan untuk membuat garam klorida, seperti natirum klorida. Asam klorida adalah kuat karena ia berdisosiasi penuh dalam air. Asam klorida merupakan asam monoprotik yang paling sulit menjalani reaksi redoks. Ia merupakan asam kuat yang paling tidak berbahaya untuk ditangani dibandingkan dengan asam kuat lainnya. Walaupun asam ia mengandung klorida yang reaktif dan tidak beracun. Asam klorida dalam konsentrasi menengah cukup stabil untuk disimpan dan terus mempertahankan konsentrasinya. Asam klorida sering digunakan dalam analisis kimia untuk “mencerna” sampel-sampel analisis. Asam klorida pekat melarutkan banyak jenis logam dan menghasilkan logam klorida dan gas hidrogen. Ia juga bereaksi dengan senyawa dasar semacam kalsium karbonat terlarut yang dapat di analisa. (Aini, 2016).

2.5 Teori Regresi

Dalam staistik, regresi polynomial adalah bentuk analisis regresi di mana hubungan antara variabel independen x dan variabel dependen y dimodelkan sebagai polynomial derajat ke $-x$ dalam x . Regresi polynomial cocok dengan hubungan nonlinier antara nilai x dan rata-rata bersarat yang sesuai dari y , dilambangkan dengan $E(y/x)$. Meskipun regresi polynomial cocok dengan model

nonlinier untuk data, sebagai masalah estimasi statistic itu linier, dalam arti bahwa fungsi regresi $E(y/x)$ linier dalam parameter yang tidak diketahui yang diperkirakan dari data. Untuk alasan ini, regresi polynomial dianggap sebagai kasus khusus dari regresi linier berganda. Variabel penjelas (independen) yang dihasilkan dari ekspansi polynomial variabel “dasar” dikenal sebagai istilah tingkat tinggi. Variabel tersebut juga digunakan dalam pengaturan klasifikasi.

2.5.1 Regresi Polinomial Berganda

Regresi polynomial merupakan model regresi linier yang dibentuk dengan menjumlahkan pengaruh masing-masing variabel predictor (X) yang dipangkatkan meningkat sampai orde ke k . Secara umum, model regresi polynomial ditulis dalam bentuk :

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \dots + b_kX^k + \varepsilon$$

Dimana :

Y = Variabel respons

b_0 = Intersep

b_1, b_2, \dots, b_k = Koefisien-koefisien regresi

ε = Faktor pengganggu yang tidak dapat dijelaskan oleh model regresi.

Model diatas menunjukkan bentuk modifikasi dari model regresi linier berganda, dimana $X_1 = X$, $X_2 = X^2, \dots, X_k = X^k$ sehingga dapat ditulis menjadi bentuk :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_kX_k + \varepsilon$$

(Malsenang, Komaliq, & Hatidja, 2012).

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini menggunakan acuan beberapa penelitian terdahulu untuk mengetahui reaksi laju korosi dengan menggunakan proses heat treatment yang direndam dalam larutan HCl sebagai media pengkorosi.

Penelitian yang dilakukan Permadi LB & Palupi AE, (2014) tentang *Analisa Laju Korosi pada Baja Karbon Ringan (Mild Steel dengan Perlakuan Bending pada Media Pengkorosi Larutan Asam*. Objek dalam penelitian ini menggunakan baja karbon ringan (*mild steel*) yang biasanya digunakan untuk tulang beton. Jumlah spesimen yang diujikan dalam penelitian ini ada 18 spesimen yang akan mendapatkan perlakuan berbeda dalam proses pengerjaan yaitu berbeda variasi waktu dan konsentrasi HCl. Spesifikasi spesimen menggunakan baja karbon ringan dengan diameter 6 mm dan panjang 102 mm dan ditekuk (*bending*) tepat ditengah panjang dari spesimen tersebut. Untuk uji rendam skala laboratorium menggunakan ASTM G31-72. Untuk peredaman dalam larutan HCl konsentrasi 16% laju korosi terbesarnya adalah 22802,38 mpy. Sedangkan untuk peredaman dalam larutan HCl konsentrasi 32% laju korosi terbesarnya adalah 73595,09 mpy. Untuk perendaman dalam larutan HCl konsentrasi 16% dan 32% laju korosi terbesarnya pada waktu perendaman selama 10 menit. Sedangkan untuk laju

korosi terkecil sebesar 4589,80 mpy dan 41125,11 mpy terjadi pada waktu perendaman selama 30 menit. Untuk perendaman dalam larutan HCl konsentrasi 16% dan 32% laju korosi terbesar pada sudut *bending* 60°. Sudut *bending* sangat berpengaruh terhadap laju korosi pada sebuah spesimen, semakin kecil sudut *bending* maka laju korosinya akan semakin besar, ini dikarenakan pori-pori atau lapisan spesimen semakin terbuka dan memberikan pengaruh terhadap proses terjadinya korosi.

Penelitian yang dilakukan Pattireuw, Rauf, & Lumintang (2013) tentang *Analisa Laju Korosi pada Baja Karbon dengan Menggunakan Air Laut dan H₂SO₄*. Pada penelitian ini, proses korosi dilakukan dengan cara perendaman material uji pada lingkungan larutan air laut dan H₂SO₄ yang telah ditampung dalam sebuah aquarium kaca agar bisa tersirkulasi dengan baik dan dengan bantuan pompa. Lamanya proses perendaman dilakukan selama 1 jam sebanyak 3 kali perendaman dan 3 jam selama 3 kali perendaman. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui korosi yang terjadi pada material baja karbon dan paduan tembaga. Kehilangan berat akibat korosi berhubungan erat dengan waktu, dengan kata lain semakin meningkatnya waktu pencelupan semakin besar pula kehilangan berat yang terjadi. Hasil pengujian laju korosi yang dilakukan dengan waktu 1 jam, didapat nilai rata-rata untuk spesimen I pada baja karbon dan paduan tembaga dalam larutan air laut adalah 0,105 mils/tahun dan 0 mils/tahun. Sedangkan pada larutan asam sulfat adalah 0,162 mils/tahun dan 0,028 mils/tahun. Hasil pengujian laju korosi yang dilakukan dengan waktu 3 jam, didapat nilai rata-rata untuk spesimen I pada baja karbon dan paduan tembaga dalam larutan air laut dan asam sulfat adalah 1,350 mils/tahun dan 0,015

mils/tahun, sedangkan pada asam sulfat adalah 1,400 mils/tahun dan 1,306 mils/tahun.

Penelitian yang dilakukan Gusti (2011) tentang *Laju Korosi Baja dalam Larutan Asam Sulfat dan Dalam Larutan Natrium Klorida*. Penelitian laju korosi baja dalam larutan asam sulfat dan dalam larutan natrium klorida secara gravimetri. Hasil penelitian dan pengamatan diperoleh bahwa semakin besar konsentrasi asam sulfat semakin bertambah besar laju korosi baja. Sebaliknya semakin besar konsentrasi natrium klorida, laju korosinya menjadi berkurang. Laju korosi baja didalam larutan asam sulfat lebih besar dibandingkan laju korosi baja didalam larutan natrium klorida.

